超硬合金加工における
電極消耗低減の研究

特殊加工研究室

指導教員　小林和彦

知能機械システム工学科

1040103

岡林　高広

目次

第1章　緒論・・・

第１章　緒論

従来の金型製作は切削加工が主流であった。しかし放電加工技術（1.1 参照）の出現により非切削加工法が認識されるようになった。初期の放電加工機では、放電の繰返し頻度が低く、加工速度が遅く、電極消耗が大きいといった欠点が多くあった為、使用頻度が低かった。しかし、その後加工速度や電極消耗などの加工特性が著しく改善され、近年の金型製作には形彫放電加工機が多く用いられている。放電加工の利点はさまざまだが、そのなかから次の二点を挙げる。

１）　非接触加工により、高精度で加工できる

２）　加工に放電を用いる為、金属であれば硬度、強度に関係なく加工ができる

この利点を活かし、超硬合金（1.2 参照）での金型製作が可能である。しかし、超硬合金を放電加工する場合、電極に消耗の比較的少ない銅タングステンを使用しても電極消耗が著しく激しいという問題が生じる。電極消耗は加工の精度を落とすだけでなく、製品のコストアップにつながってしまう。超硬合金放電加工時の電極消耗低減は今後大きな課題になるのは明確である。そこで本研究では、超硬合金加工時における電極消耗の調査研究を行う。

1.1 放電加工とは

放電加工とは、放電を利用して金属材料を加工する特殊加工である。銅など柔らかい導電性の材料を工具（電極）として、焼きの入った金属や超硬合金のような非常に硬い材料（ワーク）を精度よく加工することができる。加工は数ミクロンから数十ミクロンの間隙で、1 秒間に数千ないし数万回の火花放電を繰り返し発生させ、溶融除去によってできた多数の放電痕の累積によってワークを加工していく。放電加工機には大きく分けて形彫放電加工機とワイヤカット放電加工機がある。

形彫放電加工は通常加工液中で行われ、銅、グラファイトなどの電極を加工したい形状のオス（凸）形に成形し、その電極でワーク上に転写（転写加工）するようにメス（凹）形状を放電加工していく。（図 1-1）形彫放電加工機は主に金型製作に用いられる。

ワイヤ放電加工はプログラムで糸鋸のように任意の形状に進めながら、ワイヤ電極と工作物の間で放電加工を行うことによって必要な形状を切り取る加工方である。（図 1-2）ワイヤカット放電加工機は電極としてφ0.03～0.30mm のワイヤ電極を用途によって材質やワイヤ径を変えて加工する。一般に価格、取り扱いやすさの点で優れている黄銅線が使用される。

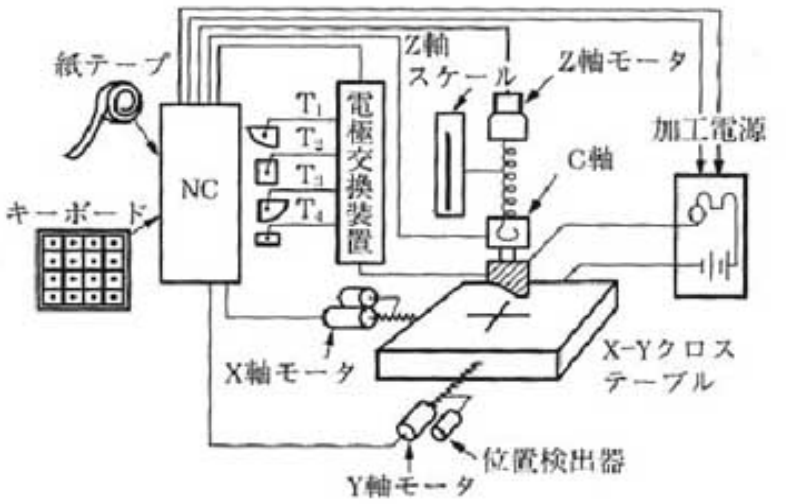

図 1-1 形彫放電加工

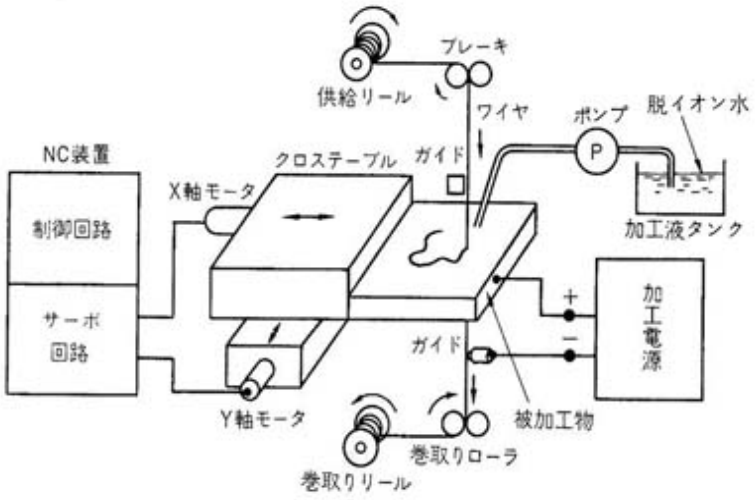

図 1-2 ワイヤカット放電加工

1.2 超硬合金とは

超硬合金とは、基本的にコバルト（Co）をバインダーとしてタングステンカーバイド（WC）を 1400℃の超高温で焼結したものである。超硬合金の特徴は硬度、強度、比重が大きく、耐摩耗性、耐腐食性に優れている。このような特徴から、バイトのチップ、金型、ベアリング、など幅広い分野で使用されている。しかし、超硬合金は切削加工において、利点とも言える高硬度、高強度が加工の妨げにもなっている。また、放電加工においても低電極消耗加工が不可能な事、クラックの発生を嫌うこともあって、電極消耗を発生する領域を使用する。

第 2 章　実験機器及び実験材料

2.1 実験機器

2.1.1 形彫放電加工機　三菱電機社製 VX10

本研究においては、図 2-1 に示す三菱製形彫放電加工機 VX10 を用いて行った。また、同機の主な仕様を表 2-1 に示す。

図 2-1　形彫放電加工機の外観写真

表 2-1　形彫放電加工機 VX-10 の主な仕様

最小指令単位	0.1 μ m
最小駆動単位	0.1 μ m
駆動方式	AC サーボモーター
位置検出方式	ロータリーエンコーダー

本研究において、使用した加工条件は、形彫放電加工機 VX-10 に内蔵されてある FAP(フレキシブル自動プログラム)を使用してプログラミングを行った FAP とは、NC 言語を一切使わずに加工手順に沿った必要最小限のデータを、CRT 画面上のプロセスシートに書き込む要領で、そのまま入力するプログラミング方式である。

2.1.2 ワイヤ放電加工機　三菱電機社製 SX10

図 2-2 に示す三菱製ワイヤ放電加工機 SX10 は、電極の作製、形彫放電後の電極先端の切り飛ばしに使用した。ワイヤは沖電線製φ0.2mm の黄銅ワイヤを使用。主な仕様を表 2-2 に示す。

図 2-2 ワイヤ放電加工機の外観写真

表 2-2 ワイヤ放電加工機 SX10 主な仕様

最小指令単位	0.1μm
最小駆動単位	0.1μm
駆動方式	AC サーボモーター
位置検出方式	ロータリーエンコーダー

2.1.3 測定顕微鏡　　MITUTOYO　TF－510F

形彫放電加工を施したワークに対して、図 2-3 に示す MITUTOYO 製 TF-510F 測定顕微鏡にて観察、及び測定を行った。この顕微鏡は 30～500 倍まで測定できる他に、測定機能を持っており、クロスゲージを利用して X 軸、Y 軸共に最小 1μm までの計測を行うことが可能である。また、機械上部にマイクロ・ネット社の NYpixW マルチシステムを介在させることにより、NIKON coolpix950 を装着してデジタルカメラで画像を記録することが可能である。本実験では電極エッジ部分、消耗長さの測定に 100 倍の倍率で用いた。同機の主な仕様を表 2-4 に示す。

図 2-3　測定顕微鏡の外観写真

表 2-3　測定顕微鏡の主な仕様

形式	支柱直立型
接眼鏡筒	30°
対物レンズ倍率	×3、×10、×50
接眼レンズ倍率	×10
透過照明装置	反射照明装置
測定最小寸法	1μm
接続用アタッチメント	マイクロ・ネット社製 NypixW マルチシステム 00201
記録用デジタルカメラ	NIKON　COOLPIX　950

2.1.4 メトラー・トレド社製 AG204 天秤

本研究では、図 2-4 に示すメトラー・トレド社製 AG204 天秤を用い電極・ワークの重量変化を測定した。表 2-4 に AG 天秤の主な仕様を示す。

図 2-4 メトラー・トレド社製 AG204 天秤の外観写真

表 2-4 AG 天秤の主な仕様

読み取り限度	0.1mg
最大秤量限度	210g
再現性	0.1mg
直線性	±0.2mg
200g 校正分銅内臓	

2.2 実験材料

2.2.1 超硬合金〈G5〉

図 2-5 に示す超硬合金が本実験での加工対象となる。

図 2-5 超硬合金(G5)の全体形状

2.2.2 銅タングステン〈C6S〉

図 2-6 に示す銅タングステンを本研究でワイヤーカットし、電極として用いる。
図 2-7 に□5mm にワイヤーカットした電極形状を示す。

図 2-6 銅タングステン(C6S)の全体形状

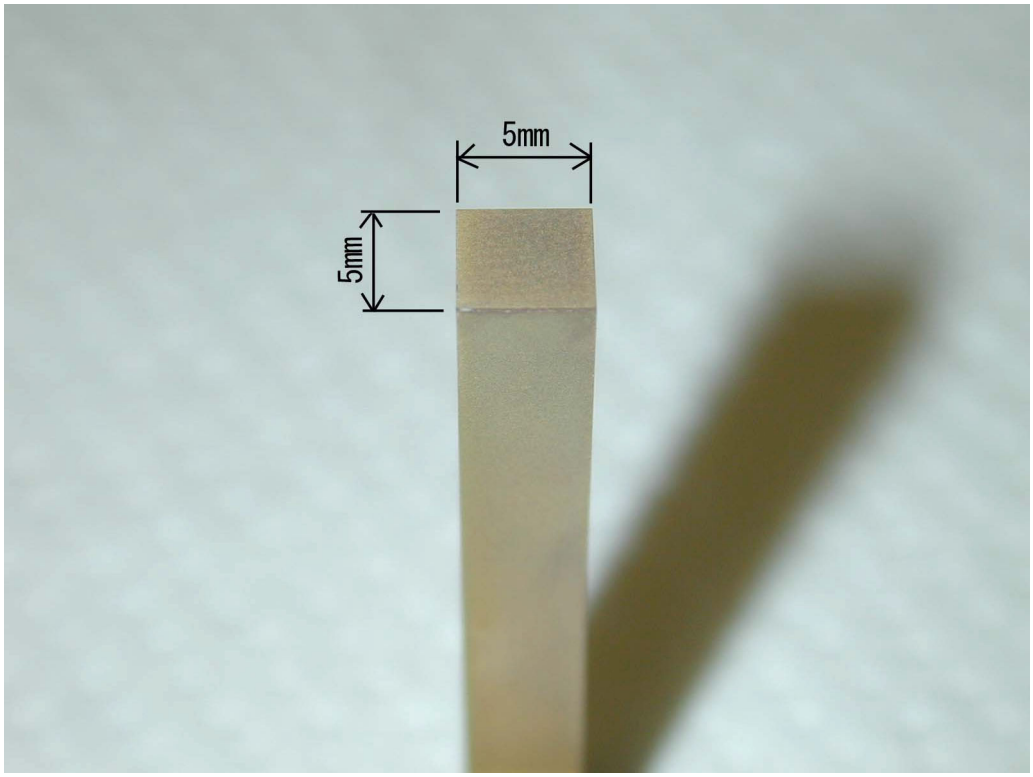

図 2-7 ワイヤーカット後の電極形状

第 3 章　サーボ電圧における電極消耗の変化の調査研究

3.1 実験方法

3.1.1 実験手順

サーボ電圧(3.2参照)を変化させて超硬合金に放電加工を行い、各測定を行う。実験は放電加工前にまずワークと電極を洗浄し、AG 天秤で重量測定を行った。そして電極エッジ部分の顕微鏡写真の撮影をした後、加工に移る。放電加工中、電極とワークの極間平均電圧を測定し、加工終了時に加工時間を測定する。加工されたワークと電極を洗浄した後、AG 天秤により重量測定と、顕微鏡写真の撮影を行う。そして、測定顕微鏡を用いて電極の消耗長さを測定し、電極エッジ部分の R の座標をとる。

3.1.2 加工条件

形彫放電加工機の加工条件は三菱推奨条件(表 3-1)からサーボ電圧 SV(ノッチ)を変化させる。

sv-3(ノッチ)～sv2(ノッチ)

変化させる。

表 3-1 加工条件

ESEL	TP
AUX	0
POL	－
IP	4.5
ON	1.0
OFF	5.0
GAP	10
JUMP	1
JU	5
JD	2
PCON	5
GAIN	80
SV	0
OPAJ	8

3.1.3 加工方法

加工は片掛け加工で行い、ワークの側面から 2mm 電極を掛けて 0.5mm の深さまで加工した。図 3-1 にイメージ図を示す。(図 3-2 加工前セッティング写真)

本実験で片掛け加工方を選んだ理由は二つある。一つ目は電極の消耗形状を比較的容易に測定できる事。二つ目に、加工が不安定になる事を避けるためである。

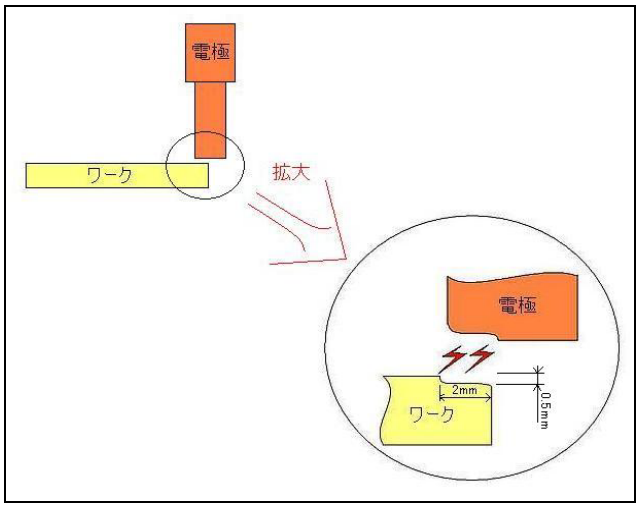

図 3-1 加工イメージ

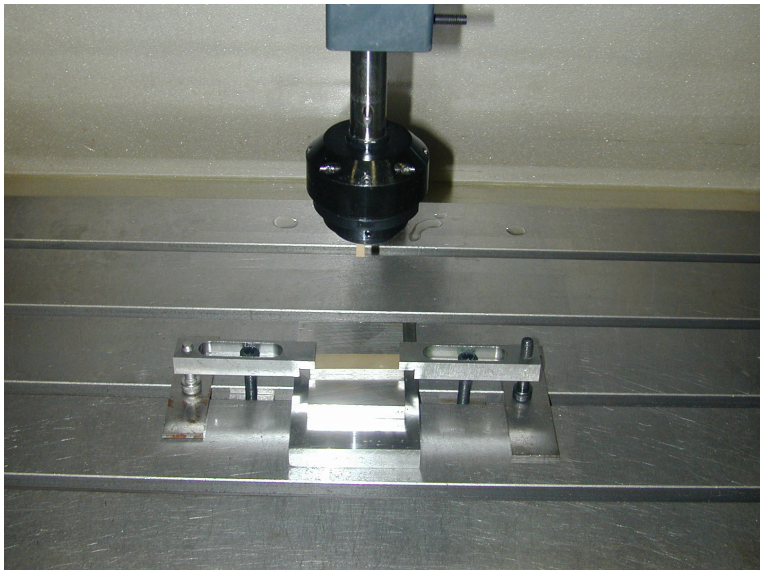

図 3-2 セッティング写真

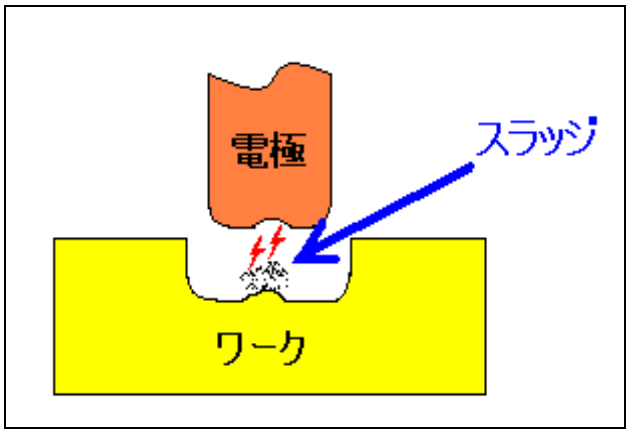

図 3-3 不安定加工イメージ図

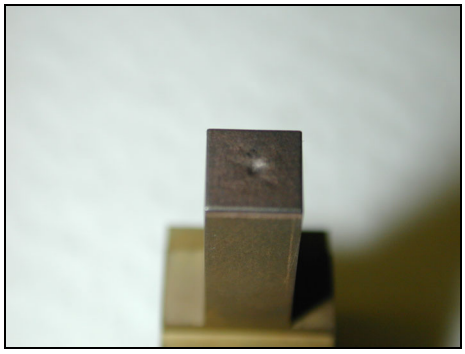

図 3-4 不安定加工の写真(電極)

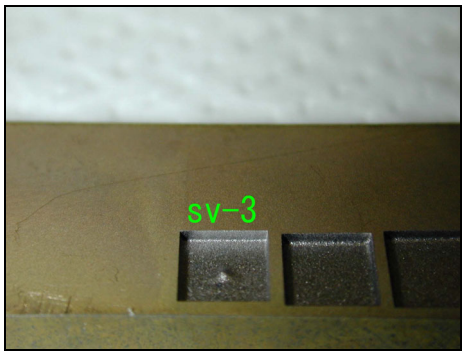

図 3-5 不安定加工時の写真(ワーク)

図 3-3 に示すように一般的な穴加工ではサーボ電圧を下げて加工すると放電間隙が小さくなり放電加工の際に発生するスラッジ（放電くず）の排出効率が極端に悪くなると考えた。ワークの中央部分が最もスラッジの排出効率が悪く電極とスラッジ間で放電してしまい図 3-4、図 3-5 のように電極とワークが凸凹の形状になってしまう。電極とワークが凸凹形状になるだけでなく、加工が不安低な為に電極消耗率など様々な実験データに影響がでる。しかし、片掛加工であれば加工した際にワークが袋形状にならず加工液がスムーズに流れる事ができ結果的に加工が安定する。

3.2 サーボ電圧(SV)とは

電極とワークの電圧を安定化させるためにサーボ動作の基準電圧を設定します。この基準電圧を元に間隙の大きさなどが決まるので、調整の際には加工状態を確認しながら行います。表 3-2 に示すように、SV が「−」側に大きくなるほど間隙が小さくなり放電の食付きが良くなります、SV が「+」側に大きくなるほど間隙が大きくなり、加工不安定時の回避動作が促進されます。

表 3-2 サーボ電圧の加工への影響

	放電間隙	加工速度	放電安定	サーボ安定	加工無駄時間
-6 ～	短絡 ↑ 狭い ↑	異常放電 ↑ 速い ↑	異常放電 ↑ 不安定 ↑	不安定 ↑ 安定 ↑	少ない
0.0	基準	基準	基準	基準	基準
～ +6	↓ 広い ↓ 開放	↓ 遅い ↓ 放電しない	↓ 安定 ↓ 放電しない	↓ 安定 ↓ 不安定	多い

3.3 実験結果と考察

3.3.1 極間平均電圧

図 3-6 に示すように、極間平均電圧は加工中にテスターを極間に接触させて測定した。実際放電加工機の電圧はパルス形状で印加されるが、テスターを用いる事で極間の平均電圧を測定する事ができる。

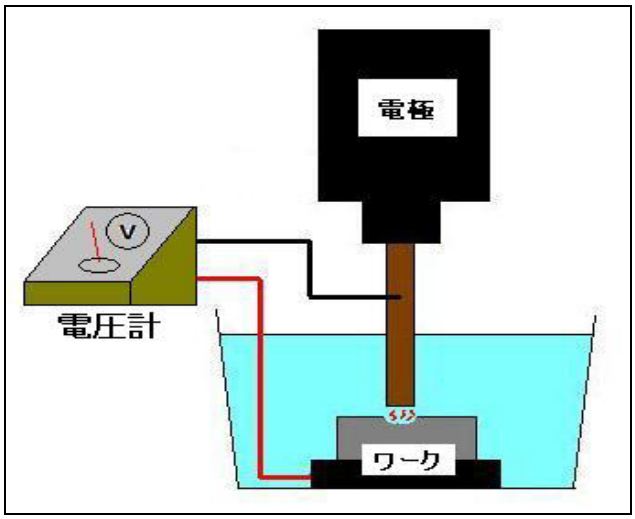

図 3-6 極間平均電圧の測定方法

表 3-3　IP4.5 極間平均電圧

	極間平均電圧(V)
sv-3	32
sv-2	34
sv-1	42
sv0	48
sv2	60

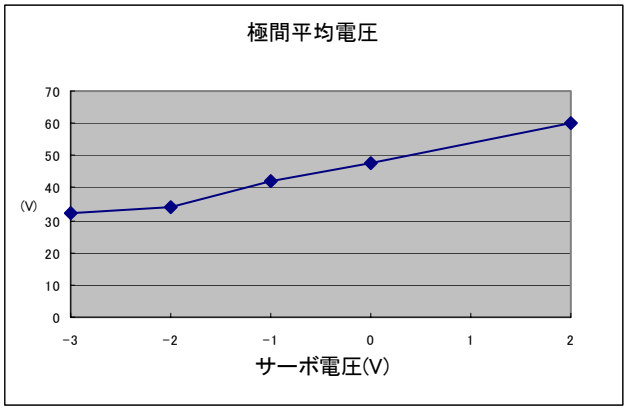

図 3-7　IP4.5 極間平均電圧

図 3-7 はサーボ電圧と極間平均電圧の関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を極間平均電圧(V)とする。サーボ電圧が高くなるにつれて極間平均電圧も高まり、ほぼ比例関係にあることがわかる。放電加工時のサーボ電圧を変化させると、電極とワークの間隙が変化する。間隙の変化は、極間の抵抗を変化させる為、オームの法則により結果的に極間平均電圧が変化したと考えられる。

3.3.2 加工時間

表 3-4　IP4.5 加工時間

	加工時間
sv-3	3.2
sv-2	3.7
sv-1	4.5
sv0	5.3
sv2	10.4

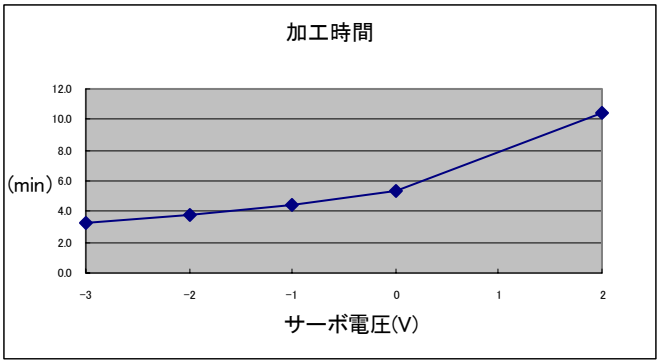

図 3-8　IP4.5 加工時間

図 3-8 はサーボ電圧と加工時間の関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧、縦軸に加工時間とする。サーボ電圧が高くなるにつれて加工時間も遅くなり、ほぼ比例関係にあることがわかる。サーボ電圧が低い時、放電間隙が狭くなり放電回数が増加するので加工時間は短くなると考える。逆にサーボ電圧が高い時、放電間隙は広くなり加工不安定時の回避動作が促進されるが、加工効率は落ち加工時間が長くなると考える。

3.3.3 電極消耗量

表 3-5　IP4.5 電極消耗量

	電極消耗量(mg)
Sv-3	9.5
Sv-2	9.8
Sv-1	9.7
sv0	9.4
sv2	9.0

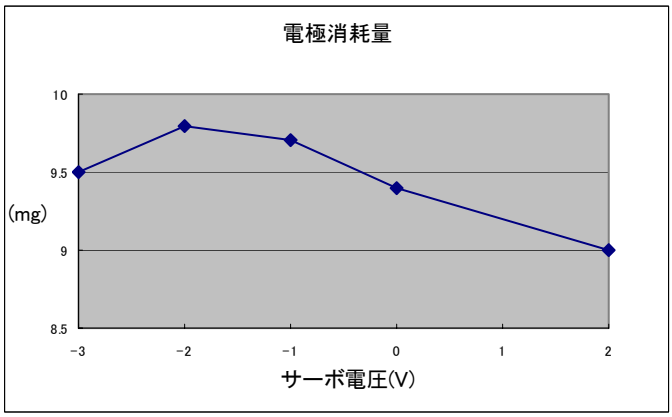

図 3-9　IP4.5 電極消耗量

図 3-9 はサーボ電圧と電極消耗量の関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧、縦軸に電極消耗量とする。サーボ電圧 SV-2(V)の時、電極消耗量が最大となり、SV2(V)の時、最小となる山型のグラフになった。

3.3.4 ワーク加工量

表 3-6　IP4.5 ワーク加工量

	ワーク加工量(mg)
sv−3	62.8
sv−2	60.5
sv−1	59.2
sv0	59.5
sv2	58.5

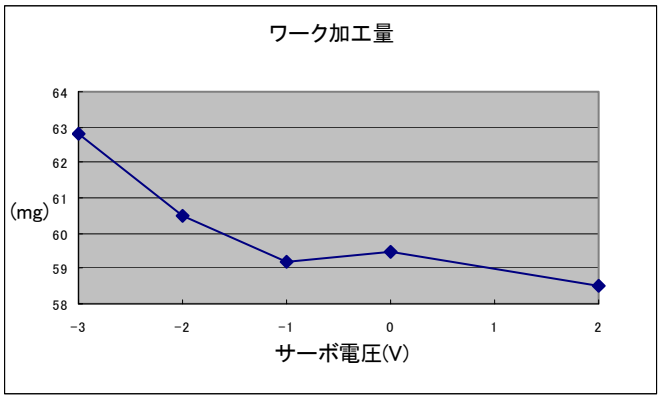

図 3-10　IP4.ワーク加工量

図 3-10 はサーボ電圧とワーク加工量の関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸にワーク加工量(mg)とする。サーボ電圧 SV-3(V)の時ワーク加工量最大となり、SV2(V)の時最小となる。サーボ電圧 SV-1(V),0(V)でワーク加工量が逆転しているが、サーボ電圧が高くなるにつれてワーク加工量は小さくなる負の比例傾向がみられた。

3.3.5 電極消耗長さ

	電極消耗長さ(μm)
sv−3	71.5
sv−2	74.0
sv−1	74.25
sv0	72.5
sv2	69.0

表 3-7　IP4.5 電極消耗長さ

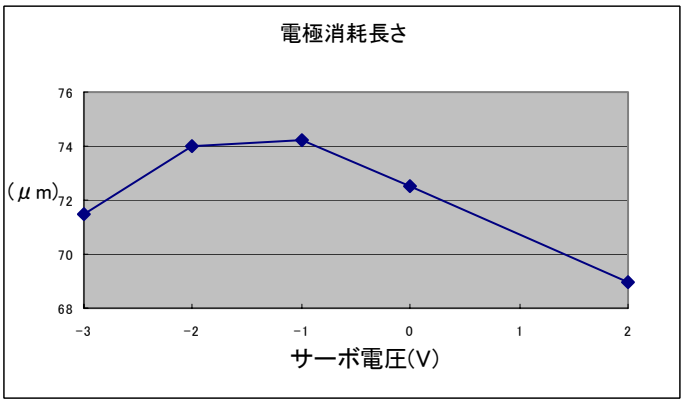

図 3-11　IP4.5 電極消耗長さ

図 3-11 はサーボ電圧と電極消耗長さの関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に電極消耗長さ(μm)とする。サーボ電圧 SV-1(V)の時電極消耗長さが最大となり SV-3(V),2(V)の時、小さくなる山型のグラフとなった。

3.3.6 ワーク加工深さ

ワーク加工深さの測定は形彫放電加工機の端面位置決め機能を利用して測定を行った。図 3-12 に示すように加工前の面を基準として、加工後の面までの深さを測定した。形彫放電加工機の端面位置決めでは、測定子がワークに接触すると電流が流れ停止する。放電加工においては主に加工を行う前のワークの位置を検出する為に用いる。

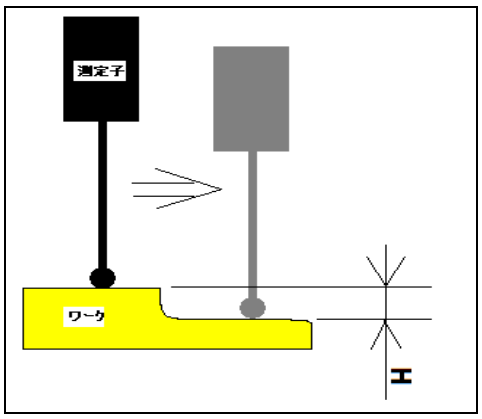

図 3-12 加工深さ測定

表 3-8　IP4.5 ワーク加工深さ

	ワーク加工深さ(μm)
sv−3	448.0
sv−2	430.3
sv−1	422.3
sv0	434.3
sv2	418.0

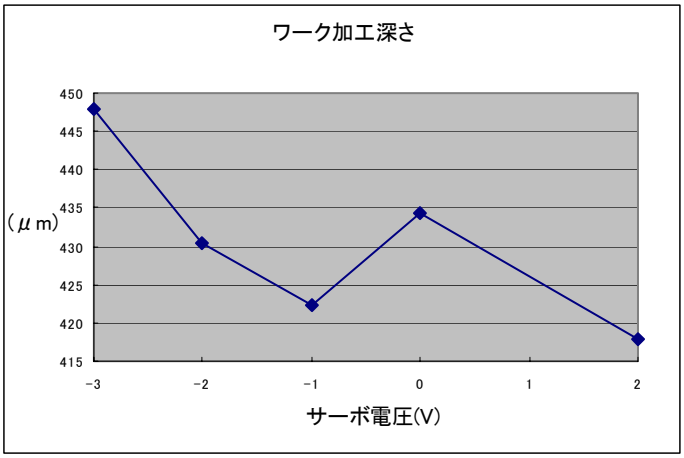

図 3-13　IP4.5 ワーク加工深さ

図 3-13 はサーボ電圧とワーク加工深さの関係をグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸にワーク加工深さ(μm)とする。サーボ電圧 SV-3(V)の時ワーク加工深さ最大となり、SV2(V)の時最小となる。サーボ電圧 SV-1(V),0(V)でワーク加工量が逆転しているが、サーボ電圧が高くなるにつれてワーク加工量は小さくなる負の比例傾向がみられた。

3.3.7 加工速度

表 3-9　IP4.5 加工速度(mg/min)

	加工速度 (mg/min)
sv-3	19.4
sv-2	16.2
sv-1	13.2
sv0	11.2
sv2	5.6

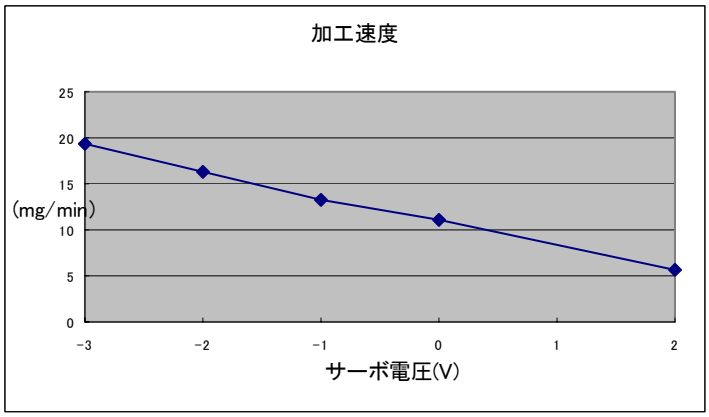

図 3-14　IP4.5 加工速度(mg/min)

表 3-10　IP4.5 加工速度(μm/min)

	加工速度 (μm/min)
sv-3	138.6
sv-2	115.3
sv-1	94.2
sv0	81.4
sv2	40.3

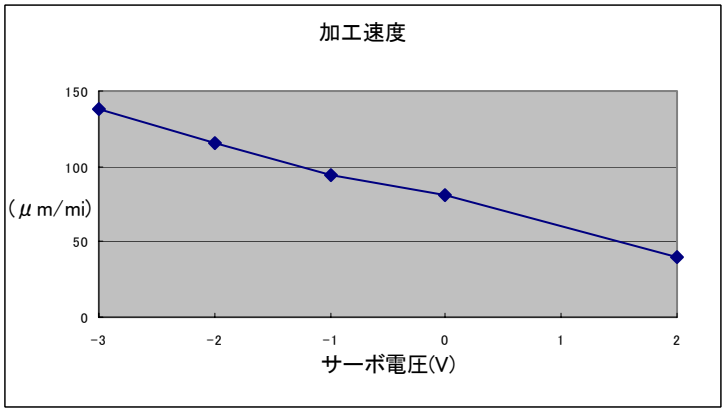

図 3-15　IP4.5 加工速度(μm/min)

図 3-14、図 3-15 はサーボ電圧と加工速度の関係をグラフ化したものである。図 3-14 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に一分あたりの加工量で表した加工速度(mg/min)とする。そして、図 3-15 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に一分あたりの加工深さで表した加工速度(μm/min)とする。どちらのグラフともサーボ電圧 SV-3(V)の時加工速度が最大となり、SV2(V)の時最小となる負の比例傾向がみられた。サーボ電圧が低い時、放電間隙は狭くなり放電の食付きが鋭くなるので加工速度は速くなると考える。逆にサーボ電圧が高い時、放電間隙は広くなり加工不安定時の回避動作が促進されるが、加工効率は落ちてしまい加工速度が遅くなると考える。

3.3.8 電極消耗率

表 3-11　IP4.5 電極消耗率(質量比)

	電極消耗率(%)（質量比）
sv−3	15.1
sv−2	16.2
sv−1	16.4
sv0	15.8
sv2	15.4

$$\text{電極消耗率(質量比)} = \frac{\text{電極消耗量}}{\text{ワーク加工量}}$$

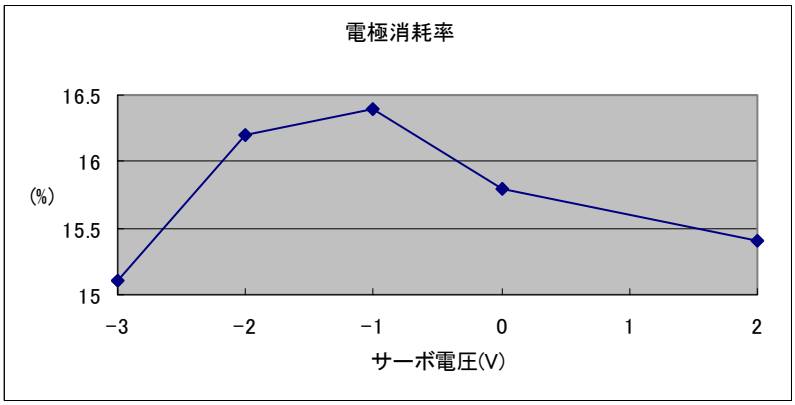

図 3-16　IP4.5 電極消耗率(質量比)

表 3-12　IP4.5 電極消耗率(長さ比)

	電極消耗率(%)（長比）
sv−3	16.0
sv−2	17.2
sv−1	17.6
sv0	16.7
sv2	16.5

$$\text{電極消耗率(長比)} = \frac{\text{電極消耗長さ}}{\text{ワーク加工深さ}}$$

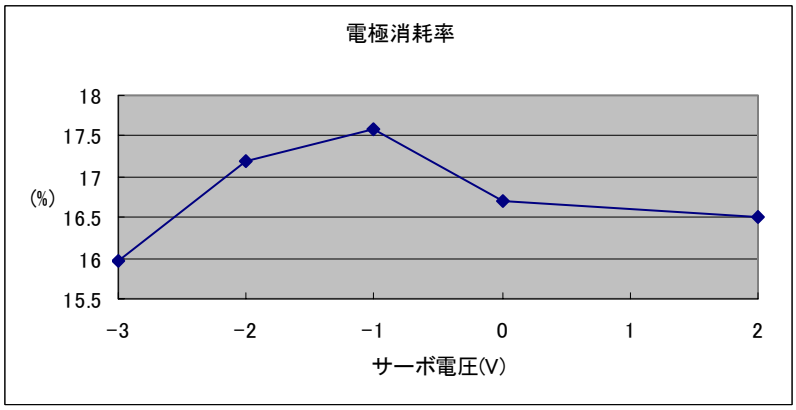

図 3-17　IP4.5 電極消耗率(長さ比)

図 3-16、図 3-17 はサーボ電圧と電極消耗率の関係をグラフ化したものである。図 3-16 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に質量比から求めた電極消耗率とする。そして、図 3-17 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に長比から求めた電極消耗率とする。どちらのグラフとも、サーボ電圧 SV-1(V)の時、電極消耗率が最大となり SV-3(V),2(V)の時、小さくなる山型のグラフとなった。電極消耗率が大きいという事はワークの加工量（加工深さ）に対して、電極の消耗が多いという事であり加工において好ましくない。

3.3.9　消耗によりできる電極の R 形状

図 3-18,図 3-19 は放電加工後の電極消耗部分をわかり易くする為に CAD により描いている。本実験は肩掛加工で加工を行った為、図 3-18,図 3-19 に示す様に四箇所で顕微鏡写真の撮影、R 半径の測定を行うことができた。

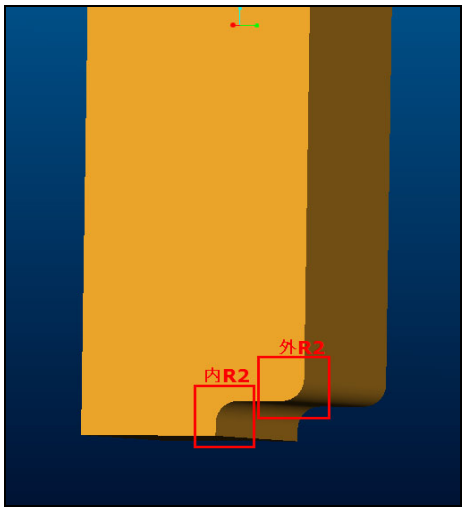

図 3-18　写真撮影箇所

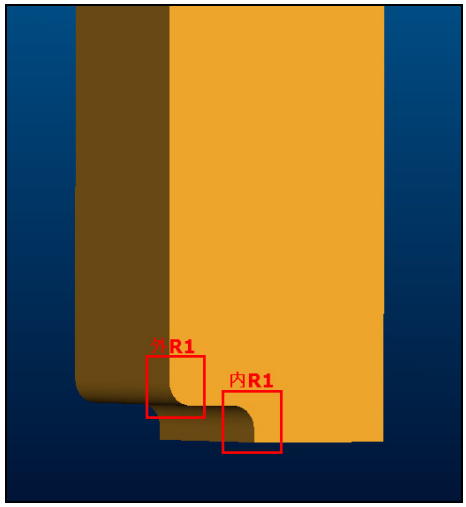

図 3-19　写真撮影箇所

(1) 外 R 形状写真

外 R 1　　**外 R2**

(倍率×100)

SV-3

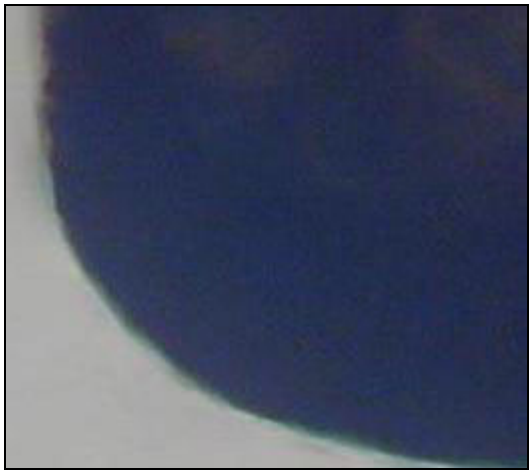

図 3-20

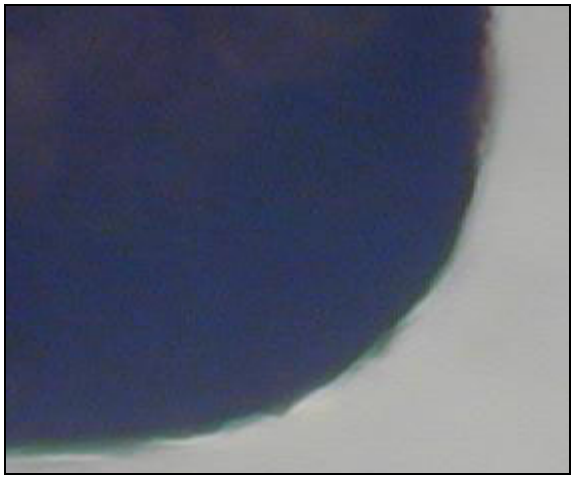

図 3-21

SV-2

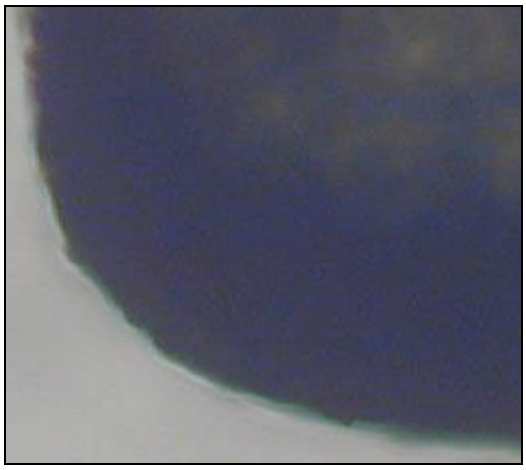

図 3-22

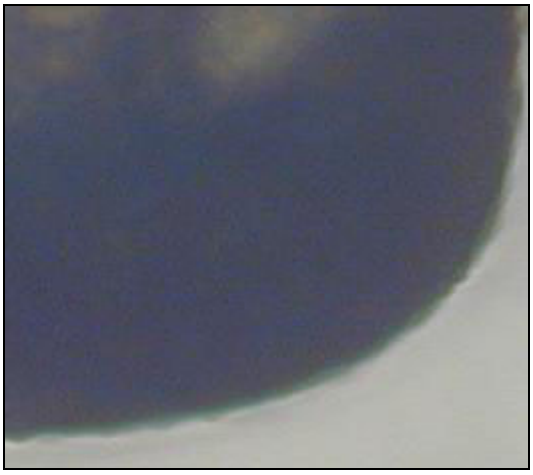

図 3-23

SV-1

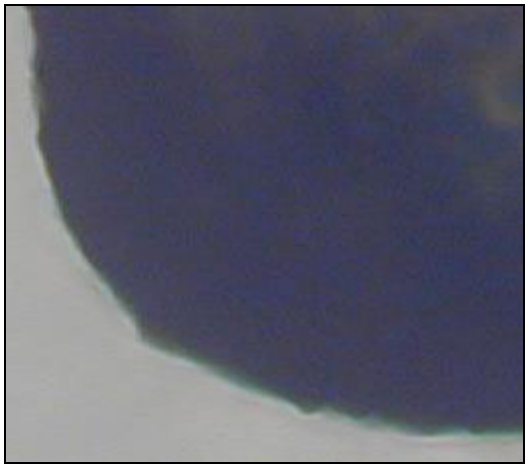

図 3-24

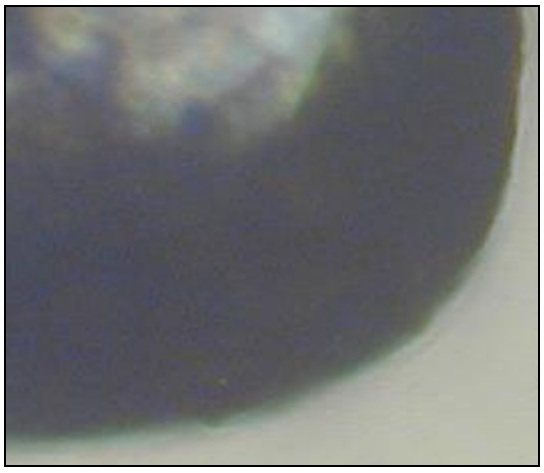

図 3-25

SV0

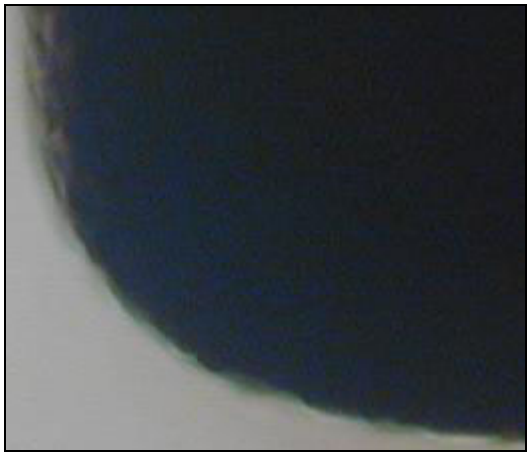

図 3-26

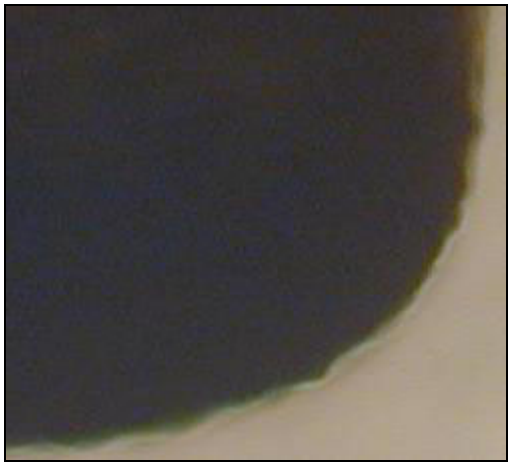

図 3-27

SV2

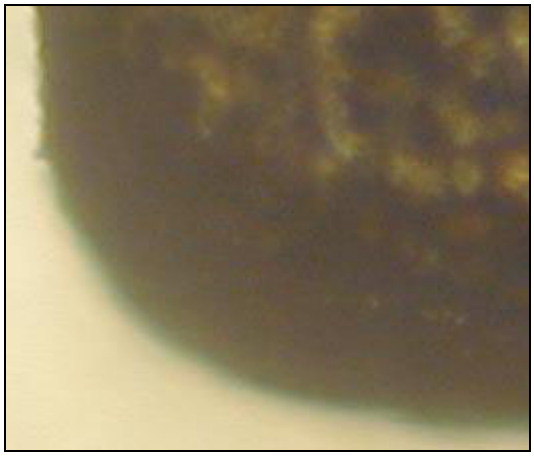

図 3-28

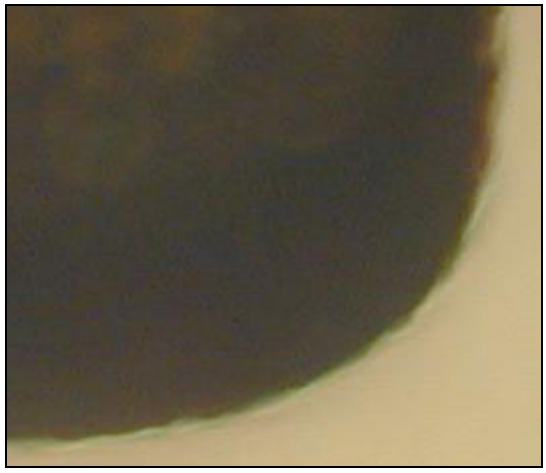

図 3-29

図 3-20～図 3-29 の写真は電極の外 R 部分の顕微鏡写真（倍率×100）である。偶数番号が外 R1 の測定写真で、奇数番号が外 R2 の測定写真である。外 R 部分(図 3-20～図 3-29)の顕微鏡写真から電極のエッジ部分に消耗により R がついてしまっているのがわかる。極端に考えると、並行方向の消耗がなくて垂直方向の消耗だけであれば電極に R は全くつかない。しかし、電極のエッジ部分は下方向からも横方向からも消耗を受ける為 R がついてしまうのだと考えられる。この写真からではサーボ電圧と電極消耗 R の関係は、R 変化が非常に小さかった為、確認できなかった。そこで、図 3-30 に示すように電極側面と電極消耗面の底面それぞれ x 座標 y 座標の 0 とし原点を定め、測定顕微鏡で R 形状を座標で表し、P.24 の(2)外 R 形状グラフとして表した。

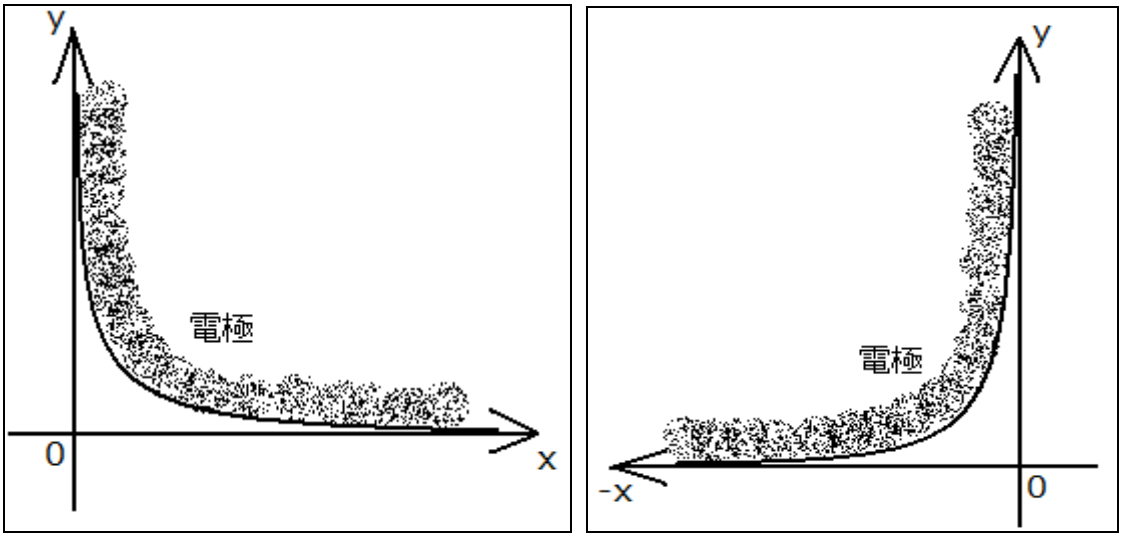

図 3-30

(2)外 R 形状グラフ

外 R１　　外 R２

SV-3

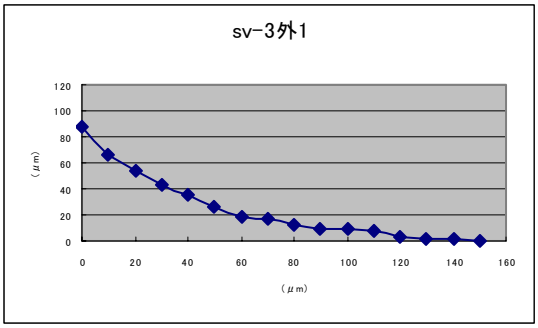

図 3-31

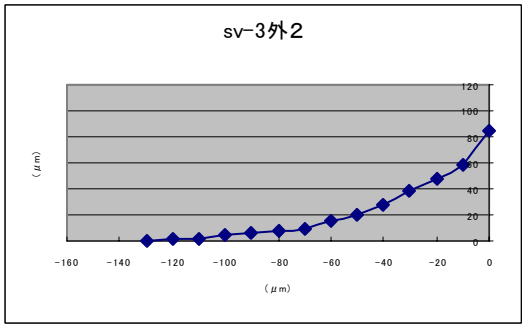

図 3-32

SV-2

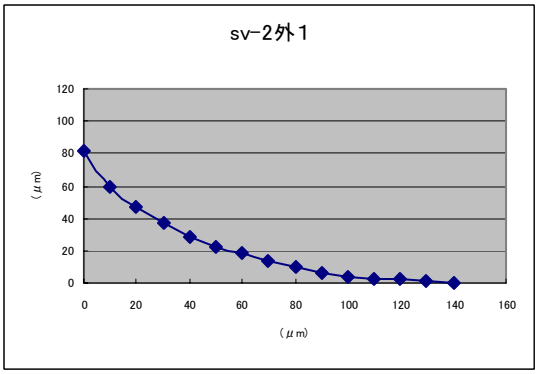

図 3-33

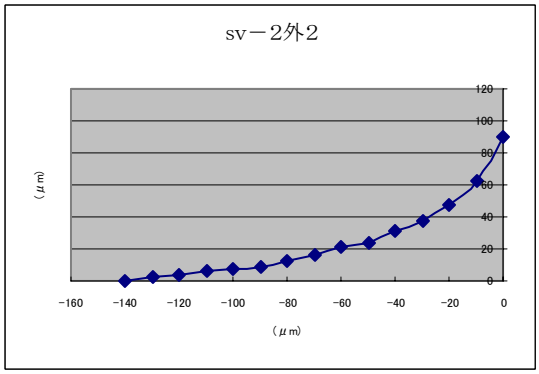

図 3-34

SV-1

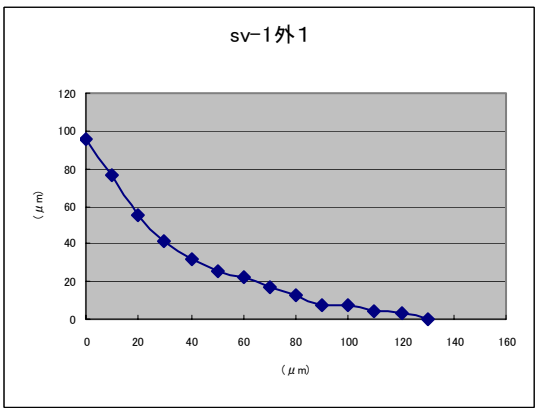

図 3-35

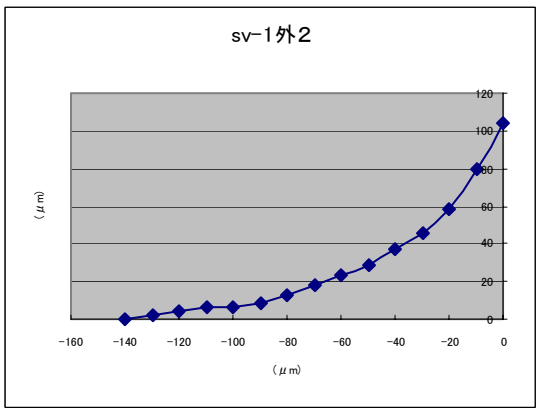

図 3-36

SV0

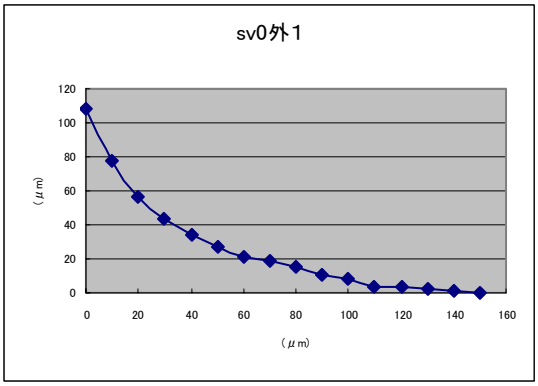

図 3-37

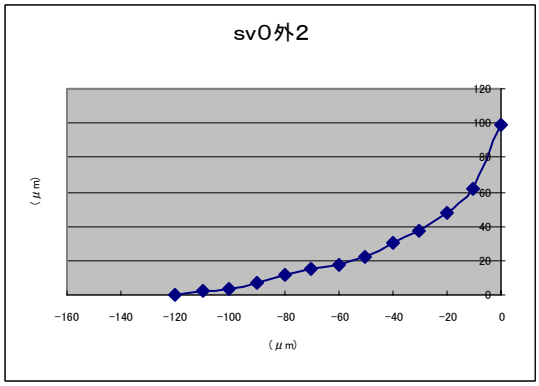

図 3-38

SV2

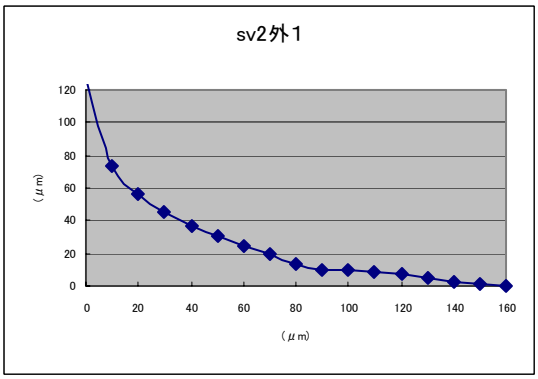

図 3-39

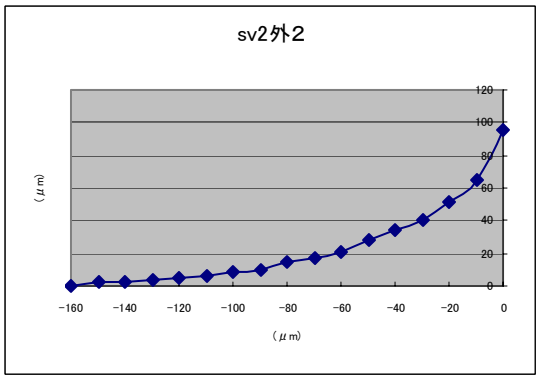

図 3-40

図 3-31～図 3-40 のグラフは電極の外 R 部分の座標をとり、形状をグラフ化したものである。縦軸、横軸ともに単位は(μm)である。そして、奇数番号が外 R1 の形状グラフで、偶数番号が外 R2 の形状グラフである。外 R 部分(図 3-31～図 3-40)の形状グラフから電極のエッジ部分に消耗により、R がついてしまっている事がわかる。この形状グラフから x 座標 10μm、50μm、100μm または、-10μm、-50μm、-100μm の y 座標から R 半径を求めて P.31(図 3-62)にまとめた。計算は Mathematica を用い数式は以下の通りである。

$$a = (10 - x)^2 + (Y_{10} - y)^2 == r^2$$
$$b = (50 - x)^2 + (Y_{50} - y)^2 == r^2$$
$$c = (100 - x)^2 + (Y_{100} - y)^2 == r^2$$
$$N[Solve[\{a, b, c\}, \{x, y, r\}]]$$

(3)内 R 形状写真

内 R１　　内 R２

(倍率×100)

SV-3

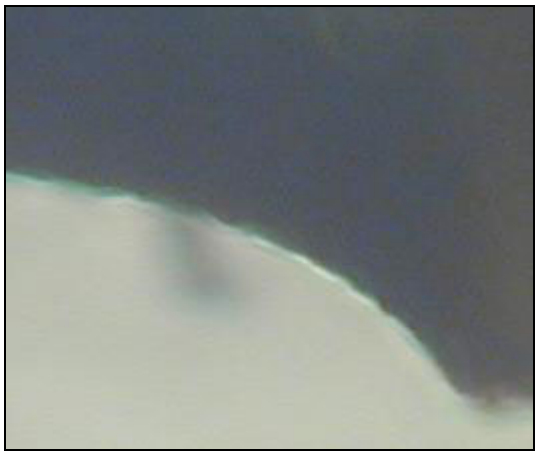

図 3-41

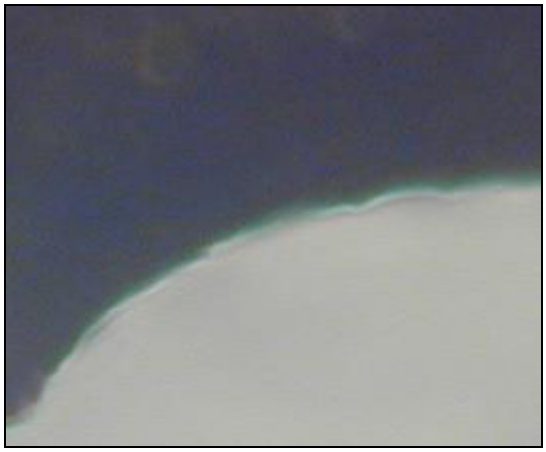

図 3-42

SV-2

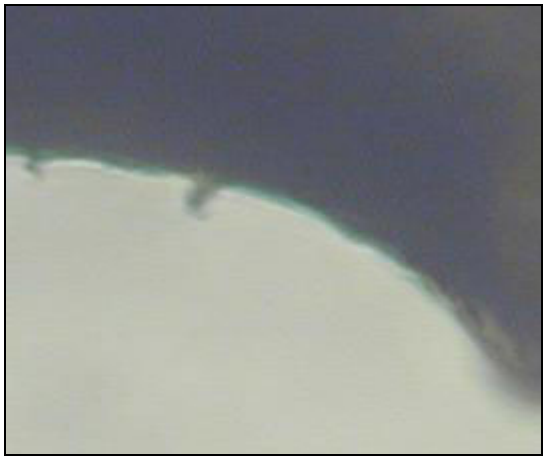

図 3-43

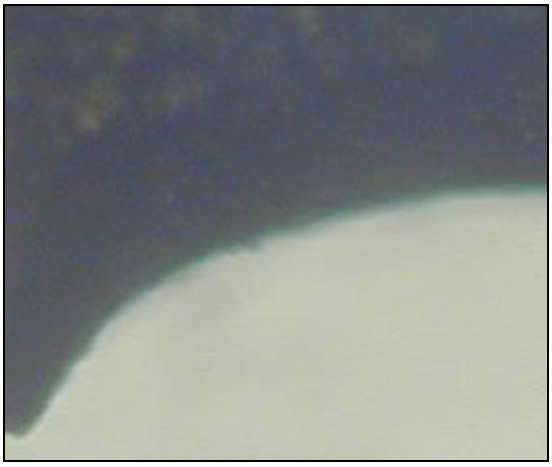

図 3-44

SV-1

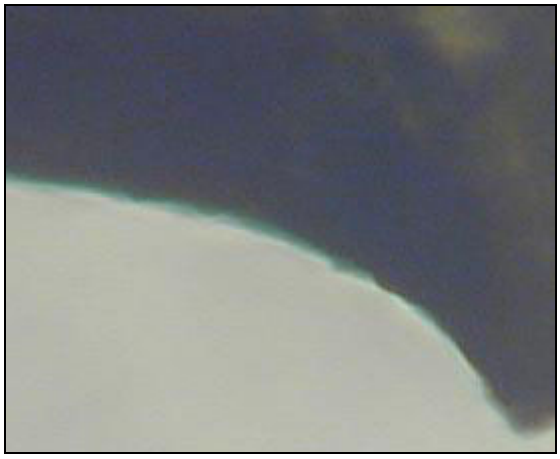

図 3-45

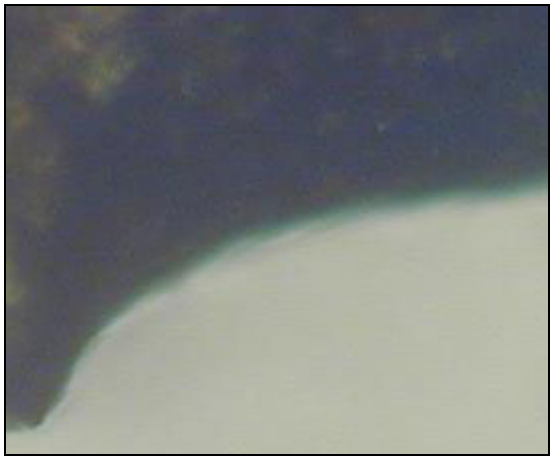

図 3-46

SV0

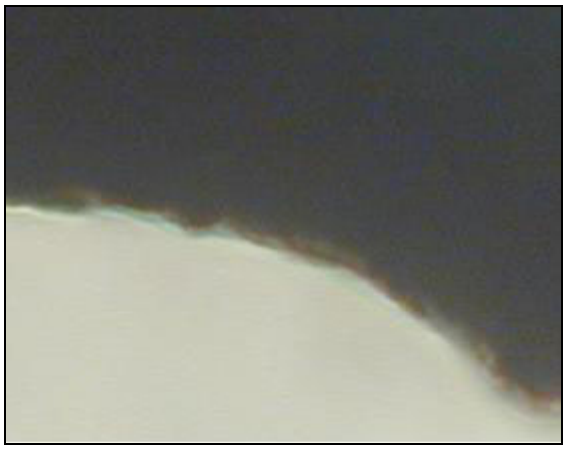

図 3-47

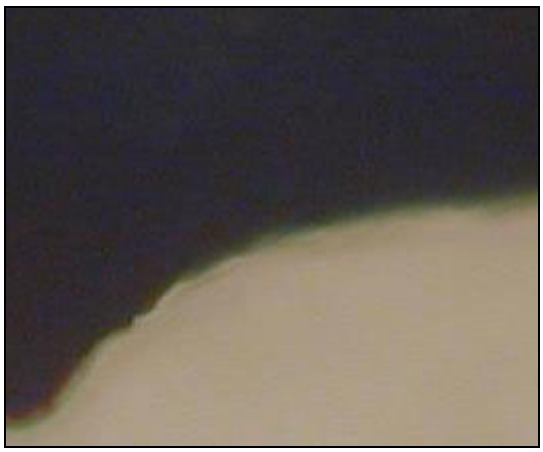

図 3-48

SV2

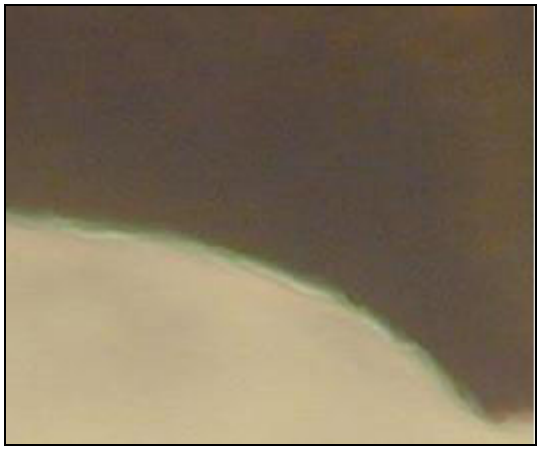

図 3-49

図 3-50

図 3-41～図 3-50 の写真は電極の内 R 部分の顕微鏡写真（倍率×100）である。奇数番号が内 R1 の測定写真で、偶数番号が内 R2 の測定写真である。内 R 部分(図 3-41～図 3-50)の顕微鏡写真から電極消耗が確認できる。加工前内 R は平面であり、ワークの角を加工した為にできた R であると考えられる。消耗した電極の高さだけ R がついている事がわかる。極端に考えると、垂直方向の電極消耗がなくなれば内 R は全くつかない。しかし、並行方向の消耗は一定で、垂直方向の消耗が小さくなれば R は大きくなってしまうのではないかと考えられる。この写真からではサーボ電圧と電極消耗 R の関係は、R 変化が非常に小さかった為、確認できなかった。そこで、図 3-51 に示すように電極底面の消耗によってできるエッジ部分を原点 0 と定め、測定顕微鏡で R 形状を座標で表し、P.29 (4)内 R 形状グラフとして表した。

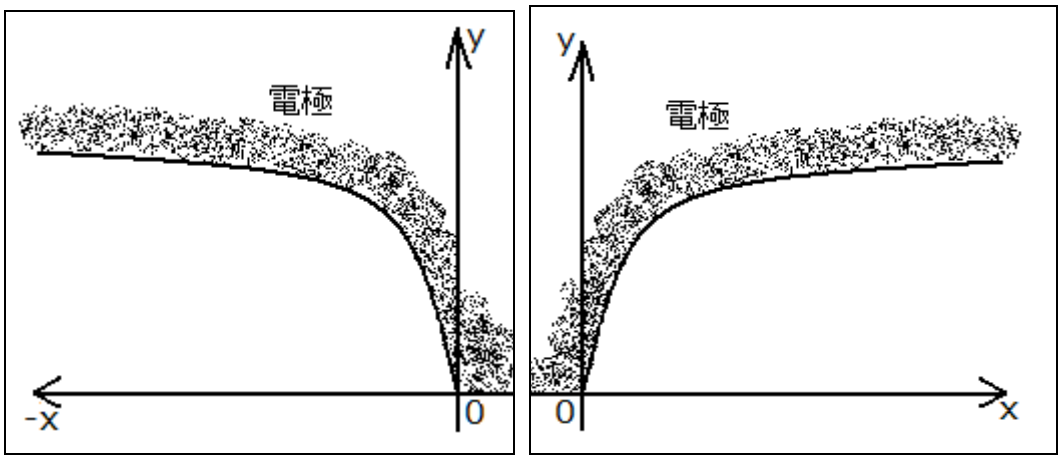

図 3-51 原点の設定位置

(4)内 R 形状グラフ

内 R１　　内 R2

SV-3

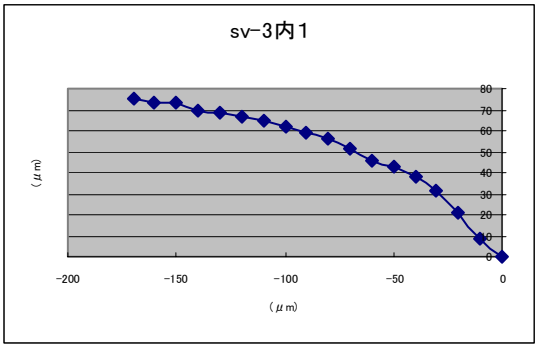

図 3-52

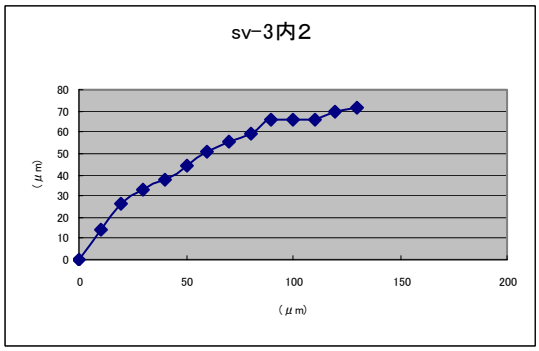

図 3-53

SV-2

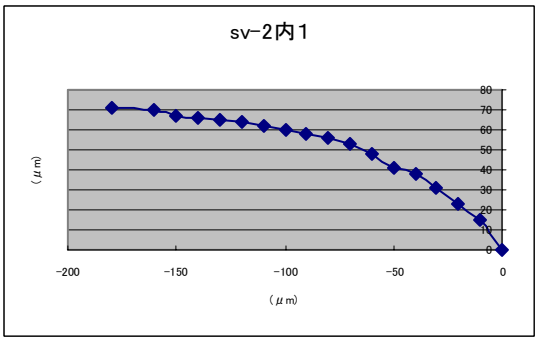

図 3-54

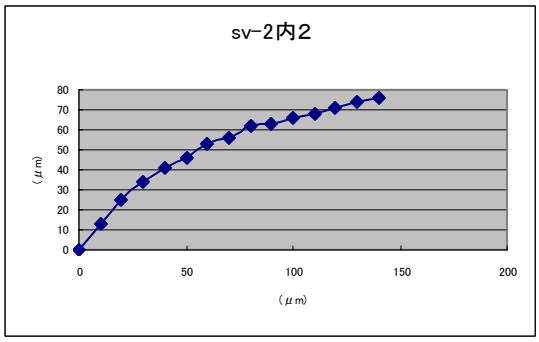

図 3-55

SV-1

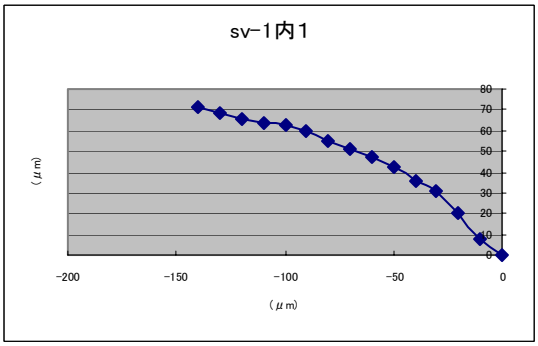

図 3-56

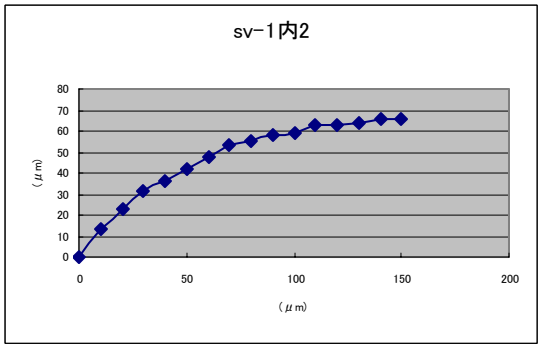

図 3-57

SV0

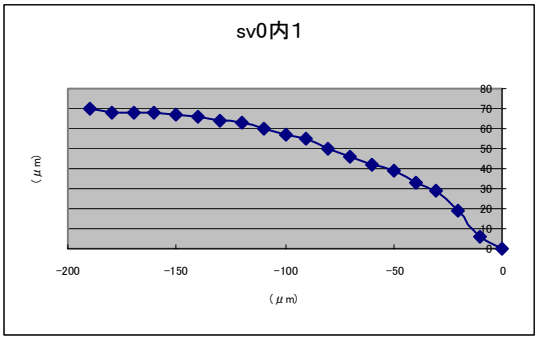

図 3-58

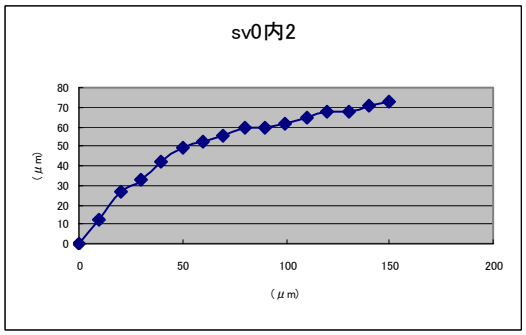

図 3-59

SV2

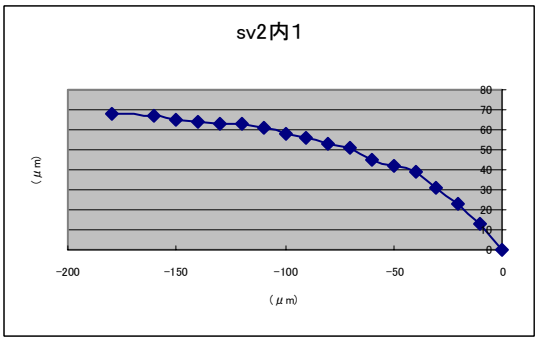

図 3-60

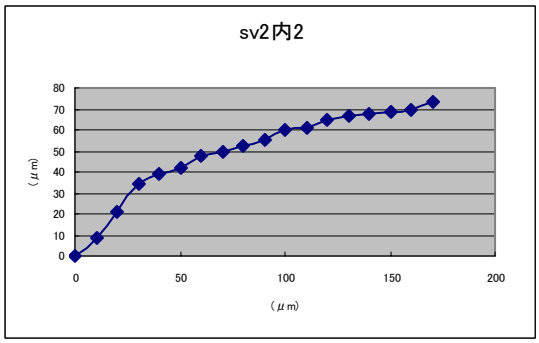

図 3-61

図 3-52～図 3-61 のグラフは電極の内 R 部分の座標をとり、形状をグラフ化したものである。縦軸、横軸ともに単位は(μm)である。そして、偶数番号が内 R1 の形状グラフで、奇数番号が内 R2 の形状グラフである。内 R 部分(図 3-52～図 3-61)の形状グラフから、はじめ平面であった電極面に、垂直方向消耗分だけ R がついてしまっている事がわかる。この形状グラフから x 座標 10μm、50μm、100μm または、-10μm、-50μm、-100μm の y 座標から R 半径を求めて P.31(図 3-63)にまとめた。計算は Mathematica を用い数式は以下の通りである。

$$a = (10 - x)^2 + (Y_{10} - y)^2 == r^2$$
$$b = (50 - x)^2 + (Y_{50} - y)^2 == r^2$$
$$c = (100 - x)^2 + (Y_{100} - y)^2 == r^2$$
$$N[Solve[\{a, b, c\}, \{x, y, r\}]]$$

3.3.10　R 測定結果

表 3-13　IP4.5 外 R 測定結果

	外 R（μm）
sv−3	120.593
sv−2	129.131
sv−1	117.11
sv0	118.071
sv2	137.98

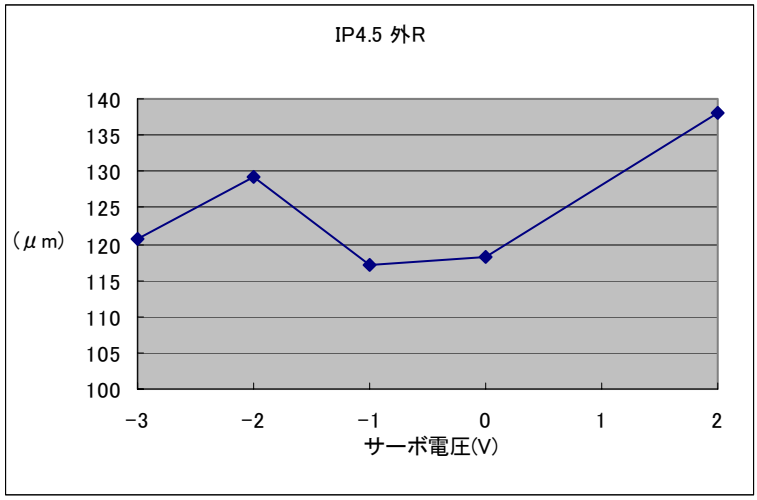

図 3-62　IP4.5 外 R 測定結果

表 3-14　IP4.5 内 R 測定結果

	内 R（μm）
sv−3	192.476
sv−2	204.659
sv−1	172.917
sv0	131.108
sv2	157.182

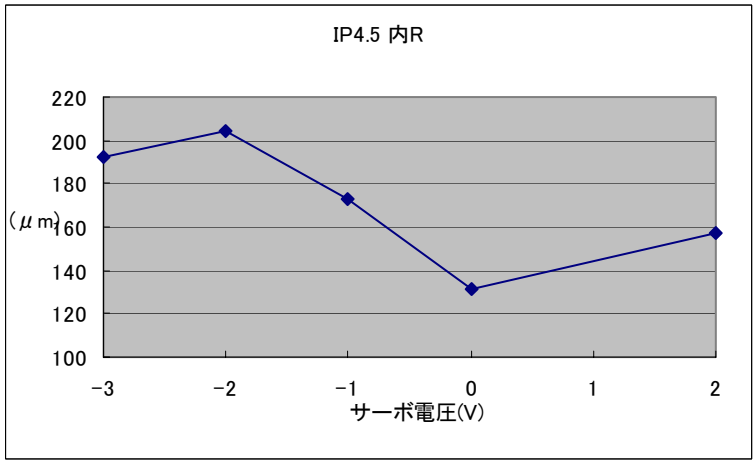

図 3-63　IP4.5 内 R 測定結果

図 3-62、図 3-63 はサーボ電圧と電極にできる R 半径の関係をグラフ化したものである。図 3-62 は外 R、図 3-63 は内 R を示す。そして両方のグラフ共、横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に R 半径(μm)とする。外 R 半径(図 3-62)のグラフではサーボ電圧 SV2(V)の時最大となり、サーボ電圧が「−」方向の時比較的 R 半径が小さく、全体的に右上がりのグラフとなった。逆に内 R 半径(図 3-63)のグラフではサーボ電圧 SV-2(V)の時最大となり、全体的に右下がりのグラフとなった。外 R 半径と内 R 半径のグラフは傾向として、全く逆の結果になった。

第 4 章　加工セティングとサーボ電圧における

電極消耗の変化の調査研究

4.1 実験方法

(1) 実験手順

第三章の実験手順で加工セッティング(4.2 参照)を変化させて行う。加工セッティングである IP(ノッチ)は IP3.5(15A)、IP4.5(25A)、IP5.5(35A)で実験を行う。

4.2 加工セッティング(IP)とは

図 4-1 に示すように､加工セッティングは放電電流のピーク値を設定します。パルス幅とともに放電波形を決定し、加工速度、面粗さ、クリアランス、電極消耗に大きく影響するので、電極やワークの材質、目標面粗さなどの加工内容によって設定を調整する必要があります。ノッチ番号を大きくするほど電流ピーク値は大きくなり、加工は安定し加工速度も速くなるが、電極消耗や面粗さは大きくなる。

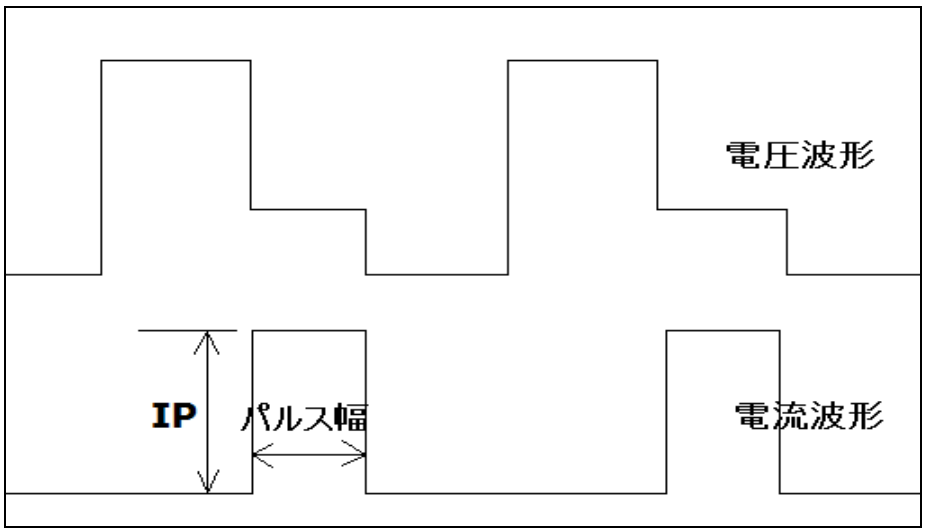

図 4-1　放電時の電流波形と電圧波形

4.3 実験結果と考察

(1)極間平均電圧

表 4-1 極間平均電圧(V)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	32	32	26
sv-2	36	34	32
sv-1	42	42	38
sv0	46	48	44
sv2	58	60	58

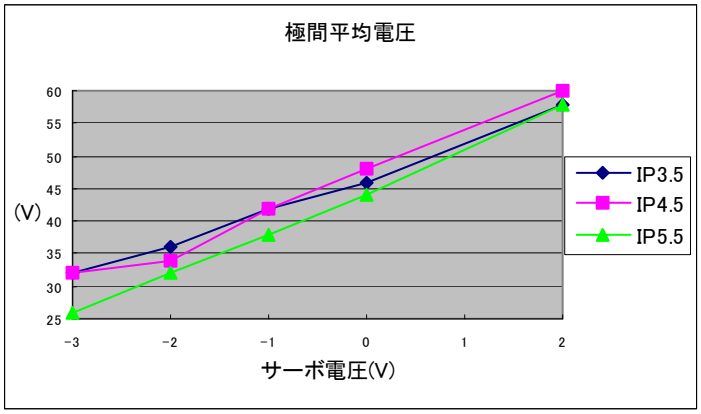

図 4-2 極間平均電圧

図 4-2 はサーボ電圧と極間平均電圧の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を極間平均電圧(V)とする。三種類の加工セッティング共に、サーボ電圧が高くなるにつれて極間平均電圧も高まり、ほぼ比例関係にあることがわかる。加工セッティング IP5.5 は IP3.5,IP4.5 に比べ極間平均電圧が若干低い結果となった。

(2)加工時間

表 4-2 加工時間(min)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	9.5	3.2	3.1
sv-2	11.9	3.7	3.4
sv-1	13.6	4.5	4.2
sv0	16.0	5.3	4.9
sv2	29.0	10.4	11.9

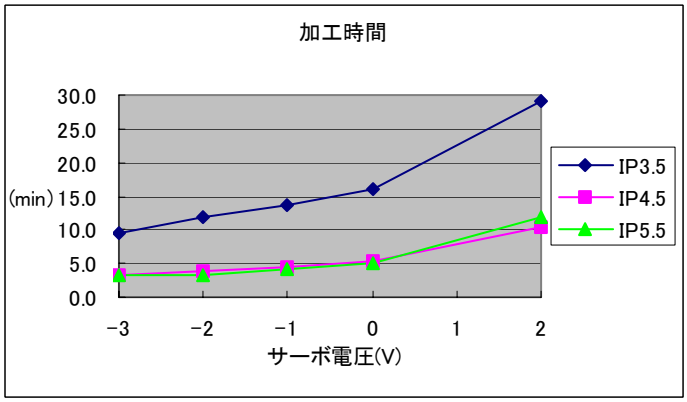

図 4-3 加工時間

図 4-3 はサーボ電圧と加工時間の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を加工時間(min)とする。三種類の加工セッティング共に、サーボ電圧が高くなるにつれて加工時間も遅くなり、ほぼ比例関係にあることがわかる。加工セッティング IP3.5 は IP5.5,IP4.5 に比べ大幅に遅くなった。ピーク電流が低い為、加工エネルギーが小さいからだと考える。

(3)電極消耗量

表 4-3 電極消耗量(mg)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	9.97	9.5	10.37
sv-2	10.16	9.8	10.1
sv-1	10.36	9.7	10.8
sv0	10.46	9.4	10.26
sv2	9.9	9	10.13

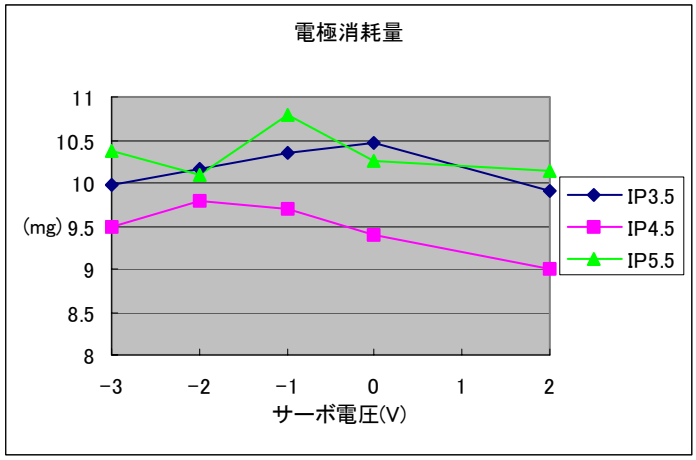

図 4-4 電極消耗量

図 4-4 はサーボ電圧と電極消耗量の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を電極消耗量(mg)とする。加工セッティング IP4.5 は IP5.5,IP3.5 に比べ電極消耗量が少なくなった。

(4)ワーク加工量

表 4-4 ワーク加工量

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	65.27	62.8	64.37
sv-2	63.23	60.5	62.43
sv-1	63.8	59.2	63.07
sv0	63.14	59.5	61.87
sv2	61.9	58.5	64

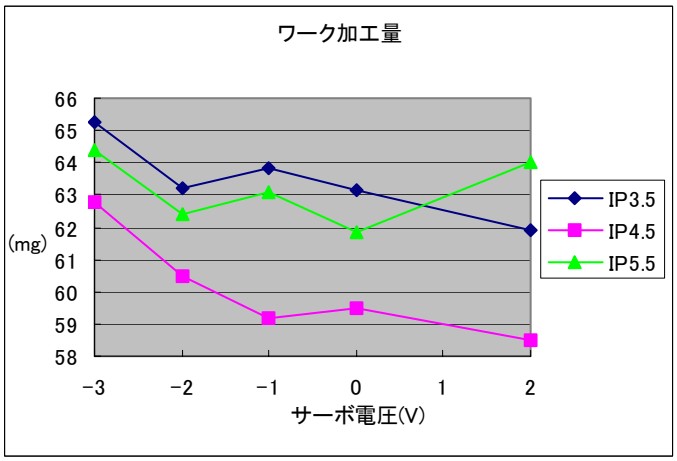

図 4-5 ワーク加工量

図 4-5 はサーボ電圧とワーク加工量の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸をワーク加工量(mg)とする。加工セッティング IP4.5 は IP5.5,IP3.5 に比べ全体的にワーク加工量が少なくなった。

(5)電極消耗長さ

表 4-5 電極消耗長さ(μm)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	70.5	71.5	72.25
sv-2	70.75	74	73.25
sv-1	71	74.25	74.25
sv0	70	72.5	72
sv2	70.25	69	69.25

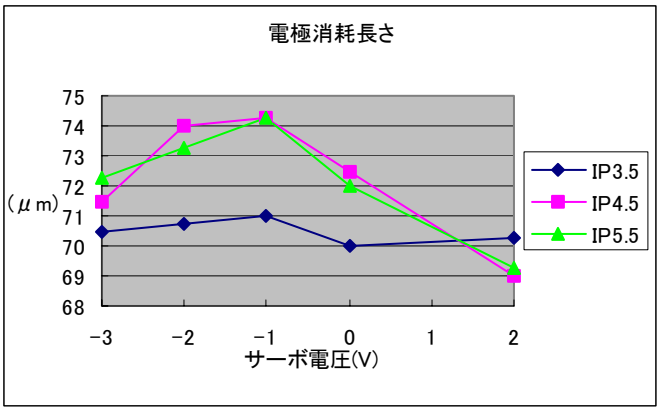

図 4-6 電極消耗長さ

図 4-6 はサーボ電圧と電極消耗長さの関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を電極消耗長さ(μm)とする。加工セッティング IP3.5 は IP5.5,IP4.5 に比べ全体的に電極消耗長さが小さくなった。そして、加工セッティング IP4.5,IP5.5 はほぼ同形状となった。

(6)ワーク加工深さ

表 4-6 ワーク加工深さ(μm)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	443.7	448	436.7
sv-2	433	430.3	431.3
sv-1	436.7	422.3	424
sv0	429.3	434.3	419
sv2	426	418	431.3

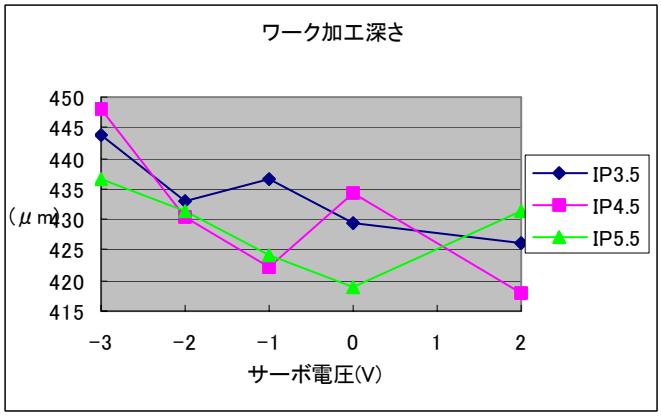

図 4-7 ワーク加工深さ

図 4-7 はサーボ電圧とワーク加工深さの関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。横軸をサーボ電圧(V)、縦軸をワーク加工深さ(μm)とする。グラフに多少のばらつきがあるものの全加工セッティングにおいて、右下がりのグラフとなった。

(7)加工速度

単位時間あたりの加工量

表 4-7 加工速度(mg/min)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv−3	6.87	19.42	20.57
sv−2	5.31	16.2	18.36
sv−1	4.7	13.2	15.12
sv0	3.95	11.16	12.58
sv2	2.13	5.63	5.36

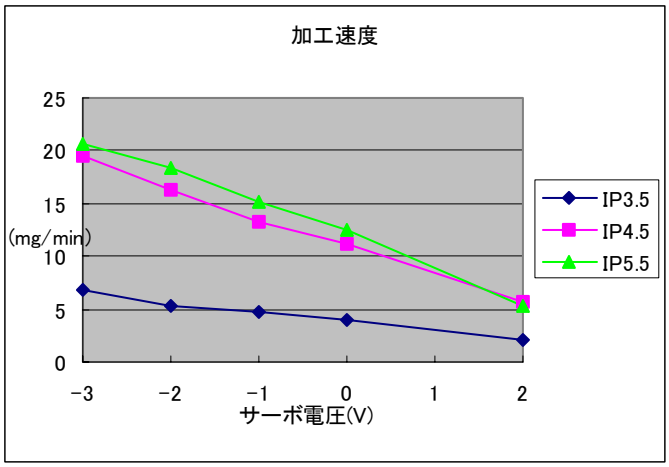

図 4-8 加工速度(mg/min)

単位時間あたりの加工深さ

表 4-8 加工速度(μm/min)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv−3	46.71	138.56	139.52
sv−2	36.39	115.26	126.85
sv−1	32.18	94.19	101.68
sv0	26.83	81.43	85.16
sv2	14.69	40.26	36.15

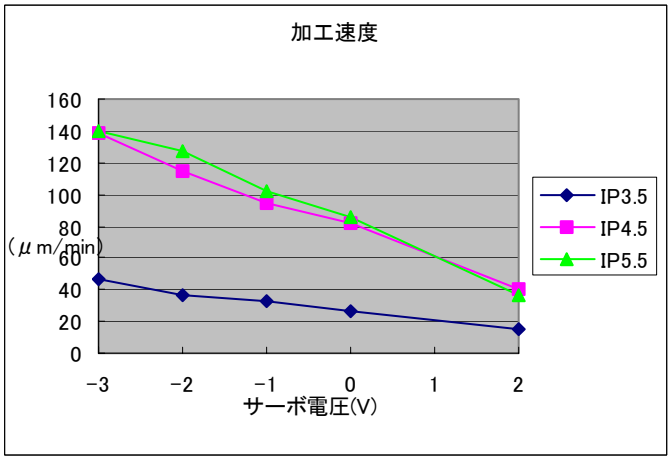

図 4-9 加工速度(μm/min)

図 4-8,図 4-9 はサーボ電圧と加工速度の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。図 4-8 に示す加工速度のグラフは単位時間あたりの加工量であらわしており、横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を加工速度(mg/min)とする。そして、図 4-9 に示す加工速度のグラフは単位時間あたりの加工深さであらわしており、横軸をサーボ電圧(V)、縦軸を加工速度(μm/min)とする。二つ両方のグラフで、加工セッティングすべてにおいて右下がりのグラフになり、加工セッティング IP3.5 は IP5.5,IP4.5 と比べ加工速度が極端に遅い。

(8)電極消耗率

表 4-9 電極消耗率(%)(質量比)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv−3	15.3	15.1	16.1
sv−2	16.1	16.2	16.2
sv−1	16.2	16.4	17.1
sv0	16.6	15.8	16.6
sv2	16.0	15.4	15.8

$$\text{電極消耗率(質量比)} = \frac{\text{電極消耗量}}{\text{ワーク加工量}}$$

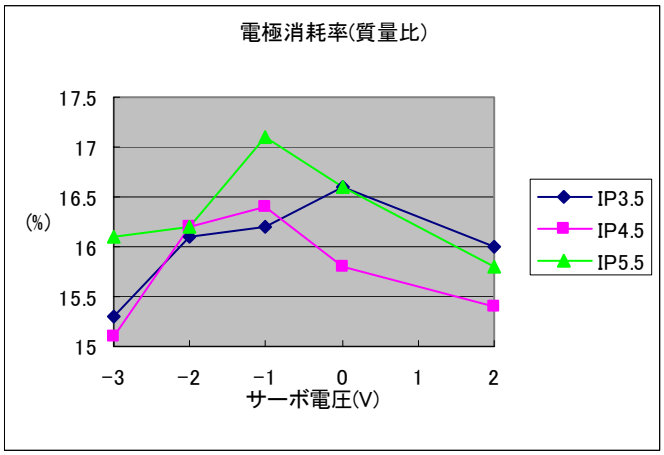

図 4-10 電極消耗率(質量比)

表 4-10 電極消耗率(%)(長さ比)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv−3	15.9	16.0	16.5
sv−2	16.3	17.2	17.0
sv−1	16.3	17.6	17.5
sv0	16.3	16.7	17.2
sv2	16.5	16.5	16.1

$$\text{電極消耗率(長さ比)} = \frac{\text{電極消耗長さ}}{\text{ワーク加工深さ}}$$

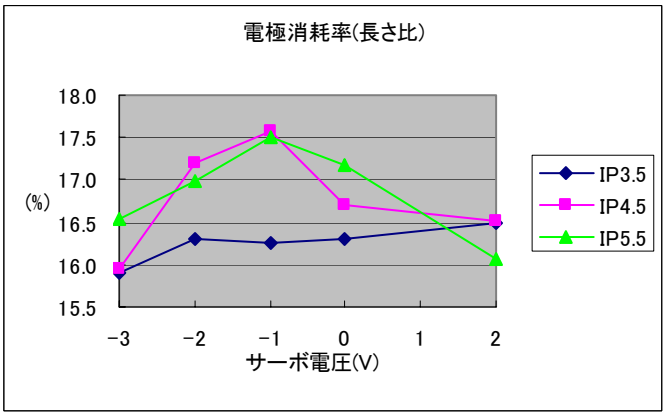

図 4-11 電極消耗率(長さ比)

図 4-10、図 4-11 はサーボ電圧と電極消耗率の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。図 4-10 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に質量比から求めた電極消耗率とする。そして、図 4-11 は横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に長比から求めた電極消耗率とする。どちらのグラフ共加工セッティング IP5.5,IP4.5 において、サーボ電圧 SV-1(V)の時、電極消耗率が最大となり SV-3(V),2(V)の時、小さくなる山型のグラフとなった。加工セッティング IP3.5 はサーボ電圧-1(V)付近で IP5.5,IP4.5 とは異なり電極消耗率が比較的低い。

(9)R 測定結果

表 4-11 外 R 測定結果(μm)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	140.174	120.593	131.383
sv-2	120.509	129.131	118.669
sv-1	130.124	117.11	123.945
sv0	113.671	118.071	115.37
sv2	119.501	137.98	112.221

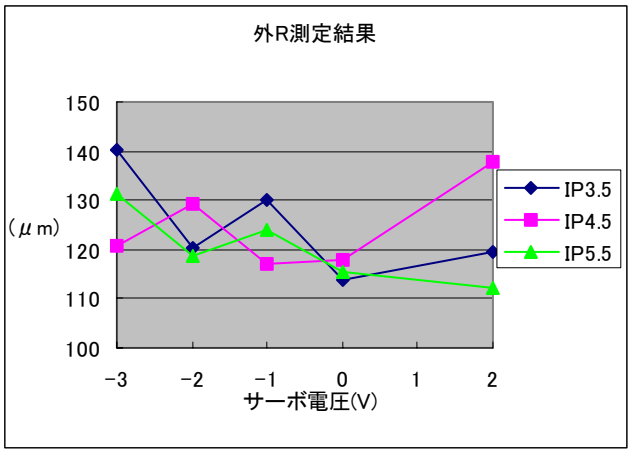

図 4-12 外 R 測定結果

表 4-12 内 R 測定結果(μm)

	IP3.5	IP4.5	IP5.5
sv-3	148.428	192.476	172.082
sv-2	136.912	204.659	156.078
sv-1	137.964	172.917	147.474
sv0	209.744	131.108	154.979
sv2	167.153	157.182	174.752

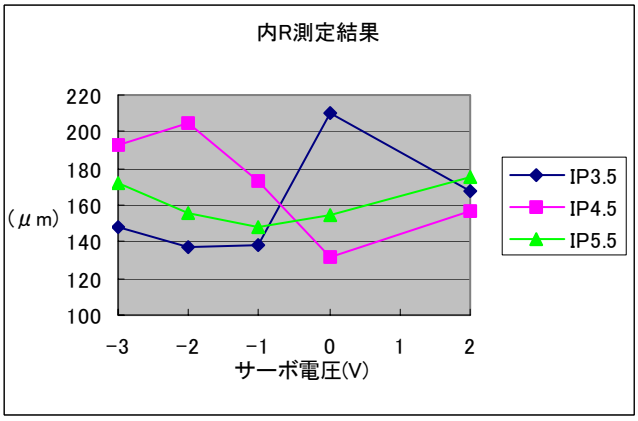

図 4-13 内 R 測定結果

図 4-12、図 4-13 はサーボ電圧と電極にできる R 半径の関係を加工セッティングごとにグラフ化したものである。図 4-12 は外 R、図 4-13 は内 R を示す。そして両方のグラフ共、横軸をサーボ電圧(V)、縦軸に R 半径(μm)とする。外 R 半径のグラフ(図 4-12)では、サーボ電圧 SV2(V)の時の R 半径の値が高くなっているが、全体的にサーボ電圧が高くなるにつれて、外 R 半径は小さくなっている。外 R 半径のグラフ(図 4-12)において、加工セッティングの外 R への影響はないように見える。内 R 半径のグラフ(図 4-13)では、サーボ電圧 SV-1(V)を境にグラフが反転している。サーボ電圧 SV-1(V)以下では加工セッティング IP4.5,IP5.5,IP3.5 の順に内 R 半径が小さくなっている。逆にサーボ電圧 SV-1(V)より電圧が高い場合は、おおよそ加工セッティング IP3.5,IP5.5,IP4.5 の順に内 R 半径が小さくなっている。

第 5 章　結論

＜第 3 章　サーボ電圧における電極消耗の変化の調査研究＞

1) 加工速度を重視すると、サーボ電圧-3(V)で加工する事が適している。

2) サーボ電圧-1(V)の時、電極消耗が著しく激しい。

3) 電極エッジ部分の R 半径を重視すると、サーボ電圧「－」で加工する事が適している。

＜第 4 章　加工セティングとサーボ電圧における電極消耗の変化の調査研究＞

1) 電極エッジ部分の R 半径を重視して加工する場合、各加工セッティング(IP)に共通にしてサーボ電圧 0(V)で加工する事が好ましい。

2) 電極エッジ部分の R 半径と電極消耗を重視して加工する場合、サーボ電圧 2(V)、加工セッティングを IP3.5(ノッチ)で加工する事が最適である。

3) 電極消耗、電極エッジ部分の R 半径、加工速度をふまえて考えた結果、サーボ電圧を SV0(V) 、加工セッティングを IP4.5(ノッチ)で加工する事が最適である。

謝辞

本研究及び本論文は、小林和彦のご指導の元に行われ、完成するに至りました。
終始御指導、ご鞭撻を賜りました同教授に厚く御礼申し上げます。

また、特殊加工研究室及び長尾研究室の方々には本研究の完成に際し、ご援助、
ご協力を頂いた事に関して感謝し、御礼申し上げる次第であります。

参考文献・資料

1)佐藤敏一：特殊加工
p6

2)向山芳世：形彫・ワイヤ放電加工マニュアル
p8

3)富本直一・岩崎健史・中村和司・大場信昭：機械加工プログラミングシリーズ3 放電加工
p3～4

4)三菱電機（株）：放電加工の仕組みと 100%活用法

5)三菱電機：三菱 NC 形彫放電加工機 VX シリーズ 取扱説明書